水晶振動子と水晶発振回路のしくみ

水晶振動子の特性を十分に引き出す発振回路のしくみを理解する

草野 淳

水晶振動子は，Q値[注1]が高いことによって任意の安定した周波数を比較的容易に得ることのできる電子部品です．しかし，その周波数を最適に得るためには，水晶振動子の特性や特徴，発振回路のしくみを理解することが重要となります．ここでは，発振周波数帯が扱いやすいこと，および広範囲な温度に対して周波数の安定度に優れていることにより，多方面で採用されているATカット[注2]水晶振動子に関して説明します．

（筆者）

ATカット水晶振動子の構造と等価回路

● 水晶チップの厚みと周波数は反比例

水晶振動子の材料となる天然水晶は，不純物の含有が多いため，現在の高性能な振動子にはそのままでは使用できません．そこで，天然水晶をオートクレーブ[注3]と呼ばれる耐圧性のある鋼鉄製の炉の中で溶解し，高温・高圧下で時間をかけて結晶を成長させた高純度の人工水晶を使用します．

図1は，その「人工水晶原石」を示しています．私たちが一般的に目にする天然水晶とは形状が異なっています．これは各結晶軸によって再成長のスピードが異なるためです．この中で，Z軸から35 °15 ′の角度で切り出した振動子をATカット振動子と呼んでいます．

ATカット振動子は，図2に示すように厚みすべりを繰り返す振動モードが特徴です．BTカット振動子も同じ振動モードを持っていますが，ATカットに比べ温度特性精度が劣るため，現在ではあまり使われていません．

また，もう一つの特徴はこの厚みが周波数を決定する重

注1：Q値とは，発振のシャープさを表す値で，周波数安定性の指標となる．Q値が高いほど発振がシャープになり周波数は安定する．

注2：水晶は切断角度でさまざまな特性を表すが，その中でも周波数温度特性が最も優れた素子にATカット振動子がある．ATカット振動子は，水晶の結晶軸である光軸（Z軸）から35 °15 ′の角度で切り出した素子．比較的作りやすく安価であるため，各種機器のクロック信号源や通信機器の基準周波数源に多用されている．

注3：オートクレーブとは人工水晶を高温・高圧下で結晶成長させる鋼鉄製の円柱で，数mから数十mの高さがある．下の方に天然のクズ水晶（ラスカと言う）を入れ，アルカリ溶液を入れ溶解させる．蒸気となった水晶を上に吊るした種（たね）水晶に付着させながら結晶成長させる装置．

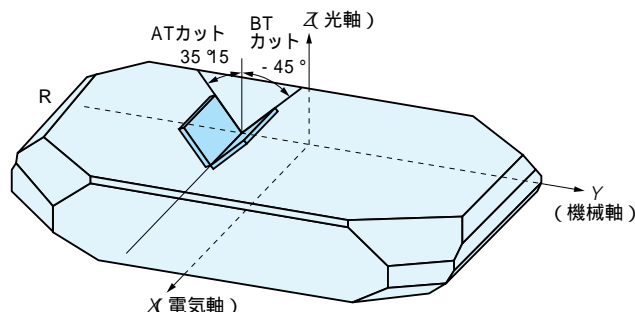



図1　人工水晶原石と切断方位

人工水晶は天然水晶を円筒状の鋼鉄製の高圧炉の中で溶融し再結晶させたもので，不純物含有の少ない高純度の水晶原石．切断方位は水晶の特性を決定付ける重要な要素である．ATカット振動子はZ軸から35 °15 ′で切り出した素子で，同じ厚みすべり振動をする．BTカットは−45 °で切り出した素子．

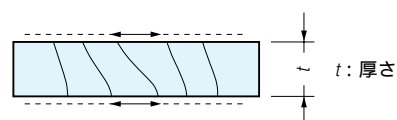



図2　厚みすべり振動

圧電素子である水晶は，電位を加えると結晶がひずむ．ATカット振動子は厚み方向にひずむのが特徴．この図は厚みすべりモードを素子の断面で模式的に表している．電荷密度が高い中央部がより大きくひずむ（振動する）．

KeyWord　Q値，ATカット水晶振動子，厚みすべり，オーバトーン発振，基本波発振，CI値，浮遊容量，負荷リアクタンス素子，DLD特性，コルピッツ型発振回路，負性抵抗，カットオフ周波数

表1 パッケージ・サイズと周波数の関係（エプソントヨコムのカタログより）

機種名	パッケージ・サイズ（mm）	周波数（10MHz 20MHz 50MHz）	24MHzのCI値（最大）
FA-128	2.0×1.6×0.5	24MHz～54MHz	80Ω
FA-20H	2.5×2.0×0.55	16MHz～44MHz	60Ω
TSX-3225	3.2×2.5×0.6	12MHz～54MHz	40Ω
FA-238	3.2×2.5×0.6	16MHz～50MHz	40Ω
TSX-4025	4.0×2.5×0.7	12MHz～32MHz	30Ω
TSX-5032	5.0×3.2×0.8	10MHz～32MHz	20Ω

要な要素であるということです．厚みが1mmのときの発振周波数は1.67MHzになります．この値を周波数定数と呼んでおり，発振周波数f_0は次の式で表すことができます．

$$f_0 = 1.67 \times \frac{n}{t} \text{ [MHz]}$$

ここで，n：オーバトーン次数（1，3，5，…の奇数）

t：厚み［mm］

この式から分かるように，発振周波数は厚みに反比例します．例えば，発振周波数が20MHzの基本波（$n=1$）であれば厚みは約83μm，50MHzの基本波であれば厚みは約33μmとなります．

ATカット振動子の対応可能な発振周波数は，その水晶チップの大きさを無視すれば下限は800kHzです．上限は近年の技術革新によって基本波でも300MHz帯まで工業化が進んでいます．従って，高周波数帯でも回路が複雑になるオーバトーン発振よりも基本波発振が主流となっています．また，周波数が高くなるほど厚みは薄くなり，機械的な強度が弱くなるので，その取り扱いおよび使用環境には十分考慮する必要があります．

一方，一般的に発振周波数と振動子サイズ（内蔵水晶チップ・サイズ）には相関があります．安定した周波数を得るためには，**表1**に示すように所望の周波数によって振動子サイズを選択する必要があります．例えば，12MHzの周波数が欲しい場合，3.2×2.5mm（以下3225と言う）サイズ以上の振動子であれば問題ありませんが，2.5×2.0mm（以下2520）や2.0×1.6mm（以下2016）サイズだと対応できません．これは，後述するようにCI（crystalimpedance）値が上昇してしまうことによります．

さらに，ATカット振動子の温度特性は，**図3**に示すように3次曲線を描くのが特徴です．横軸が温度で縦軸は周波数変化量を表しています．各3次曲線は切断角度の基準となるZ軸からの角度35°15′からのズレを表しています．

このように，切断角度を変えることによりあらゆる規格に対応させることが可能となります．温度特性が3次曲線を描くことにより，ほかのカットの振動子と比べて広温度範囲で1桁以上安定した周波数が得られます．例えば，世界で一番使われているGSM方式の携帯電話の基準周波数である26MHzの場合，－30℃から＋85℃の温度範囲で±10ppm（26MHz±260Hz，ppmは100万分の1）以内を実現しています．

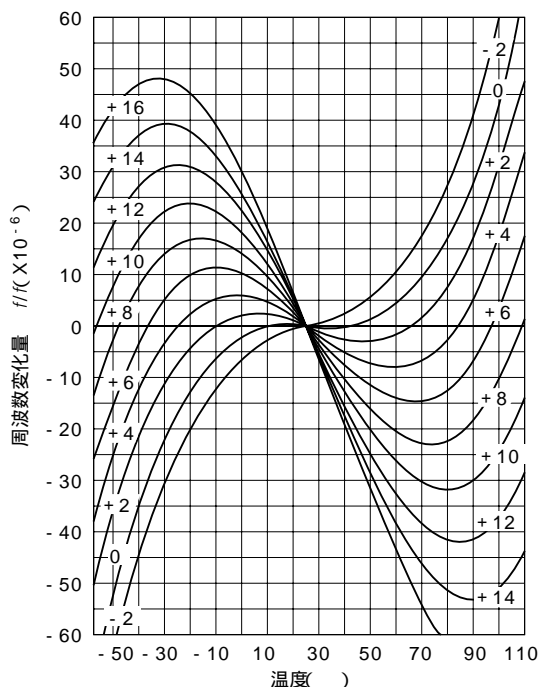



図3 ATカット振動子の温度特性

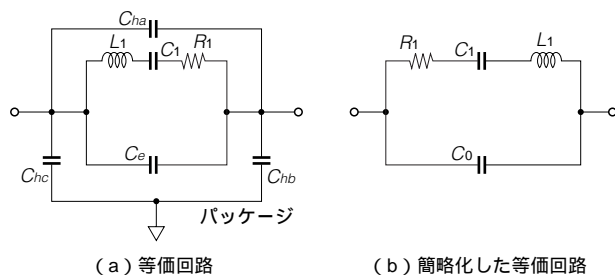
ATカット振動子は，3次の周波数温度特性を示すのが特徴．横軸は温度，縦軸は周波数の変化量で，25℃を基準として表している．図中の数値は切断角度35°15′からのズレを表しており，単位は「′」（分）．

C_{ha}：パッケージのホット端子間容量［F］
C_{hb}，C_{hc}：パッケージのホット端子とグラウンド端子間容量［F］
L_1：等価直列インダクタンス［H］
C_1：等価直列容量［F］
C_h：保持器の容量［F］
C_e：電極容量［F］
C_0：C_h＋C_e実効並列容量［F］
R_1：等価直列抵抗［Ω］

図4　水晶振動子の等価回路

図(a)は表面実装型振動子全体の等価回路を表している．C_{ha}はパッケージのホット端子間容量，C_{hb}，C_{hc}はパッケージの各ホット端子とグランド端子間の容量．通常，図(b)のようにパッケージ容量と振動子電極間容量をまとめてC_0として表している．

● 水晶振動子の電気的等価回路

図4(a)は水晶振動子の電気的等価回路を示しています．高周波部品なので浮遊容量[注4]が水晶チップの周りに発生しますが，一般的には，**図4(b)**のように簡略化した等価回路を使用してなんら問題はありません．ここで，C_1は等価直列容量で水晶片のコンプライアンスを示し，L_1は等価直列インダクタンスで，振動している部分の質量を表しています．

C_0は等価並列容量で水晶チップ支持系の浮遊容量を含めた電極間の静電容量です．R_1は等価直列抵抗(＝CI値)で，振動エネルギーの損失(振動時の内部摩擦，水晶チップ支持系の機械的損失，音響損失など)となります．

この電気的等価回路には二つのゼロ位相となる周波数が存在します．**図5(a)**は，共振周波数近傍におけるリアクタンス特性を示していますが，直列共振周波数f_rと並列共振周波数f_aがゼロ位相となる周波数になります．このリアクタンス条件を変化させることによって，発振周波数は精度よく変化させることができます．その周波数可変量はC_0とC_1の比であるγ(以下，容量比と言う)に反比例します．

$$\gamma = \frac{C_0}{C_1}$$

また，各パラメータの関係は次の近似式で表すことができます．

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$Q = \frac{\omega L_1}{R_1}$$

ここで，ωは角周波数($2\pi f$)，QはQ値です．

最近は携帯電話に代表されるモバイル用途を中心に振動子の小型化が進んでいます．しかし，同一周波数で比べると水晶チップのサイズが小さくなればなるほどR_1とL_1の値が大きくなる，つまり発振しづらくなるので注意が必要です．

C_1：等価直列容量
L_1：等価直列インダクタンス
R_1：等価直列抵抗
C_L：負荷容量
C_0：等価並列容量
f_a：並列共振周波数
f_r：直列共振周波数
f_L：負荷の共振周波数

図5　共振周波数近傍におけるリアクタンス特性

図(a)は振動子のみ，図(b)は直列に負荷容量を入れた場合，図(c)は並列に負荷容量を入れた場合の共振周波数近傍におけるリアクタンス特性を表している．f_rが直列共振周波数，f_aが並列共振周波数，f_Lが負荷時の共振周波数．

注4：高周波の発振回路には，部品以外にパターンの引き回しやグラウンドの取り方などで，固有の寄生容量が発生する．これらを総称して浮遊容量と呼んでいる．場合によっては素子の容量より大きくなることがあり，その影響が無視できず振動子側では解決できない恐れもある．

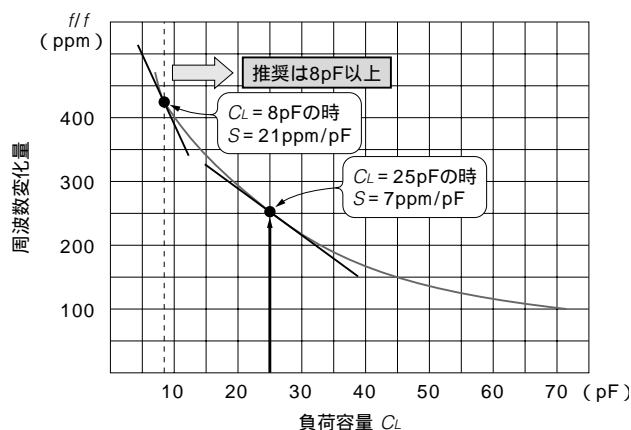



図6　負荷容量特性の例

横軸は負荷容量，縦軸は周波数変化量．負荷容量が小さいほど周波数変化量が多くなり，周波数の調整範囲が広く取れる．しかし，傾きが大きくなり回路上のわずかの浮遊容量の変化により周波数が大きく変わる．例として負荷容量が8pFと25pFの場合の傾きを表示してある．

図7　周波数のDLD特性

横軸は振動子にかかるドライブ・レベル，縦軸は周波数変化量．数値は振動子サイズを表しており，それぞれの特性例を示している．振動子のサイズが小さくなるほど低いドライブ・レベルでも周波数の変化（非線形上昇）が始まる．

● 負荷容量が周波数を決定する

一般的に，水晶振動子は容量性の負荷リアクタンス素子C_L（以下，負荷容量と言う）を用いて発振周波数を可変させます．**図5（b）**は振動子と負荷容量を直列接続した発振回路の例です．この場合，**図5（a）**の低インピーダンスの動作条件と同様に負荷時共振周波数f_Lの振動子として低インピーダンスで発振します．ここで，f_Lとf_rとの周波数ずれは負荷時共振周波数オフセットD_Lとなります．

図5（c）は振動子と負荷容量を並列接続した発振回路の例です．負荷容量C_Lに対してD_Lの値は同じですが，回路のインピーダンスは高くなり，発振器用としては不向きになります．

実際に周波数の調整をする場合は，この負荷容量を可変することになります．その負荷時共振周波数オフセット値は次の式で計算できます．

$$D_L = \frac{(f_L - f_r)}{f_r} \quad \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

図6に，負荷時共振周波数オフセットの負荷容量特性の例を表します．この特性は，振動子（内蔵水晶チップ）サイズや電極の設計などで異なります．図のように負荷容量が小さくなればなるほど曲線の傾きが急峻（きゅうしゅん）となり，回路周りの微小な浮遊容量などの変化にも敏感に影響し，発振周波数に誤差が生じたり発振そのものが不安定になる可能性があるので注意が必要です．従って，一般的には負荷容量は8pF以上を使う場合が多く，それ以下はあまり推奨できません．

メーカのカタログには標準負荷容量値が記載されているので，その数値を使用すればまず問題はありません．

また，この曲線の接線は上式を微分したものに相当し，周波数可変感度Sと呼ばれています．

$$S = \frac{dD_L}{dC_L} \quad -\frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2}$$

等価直列抵抗R_1は電気的等価回路のパラメータの中で重要な要素です．このパラメータは，振動子のQ値と発振強度を左右するものです．また，**図5（b）**，**図5（c）**のように負荷容量が入ると，実質的な負荷時等価抵抗値R_Lは次式に示すように増加します．

$$R_L = R_1\left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2$$

この式から，振動子のC_0の設計値が同じであれば負荷容量値が小さいほど等価抵抗値は上昇し，発振しづらくなることが分かります．このことからも，負荷容量はあまり小さくしないことが肝要です．

● 回路側で考慮すべき水晶振動子の癖

前述したように，水晶振動子は機械的な振動をしています．従って，発振回路の水晶電流を多く流せば，その振動の振幅は増加し，最終的には破壊を招く恐れがあります．励振レベルを上げると機械的な振動のひずみや内部摩擦による微小な温度上昇の影響で発振周波数の変動や安定度の劣化，電気的等価回路パラメータの変動，周波数のひずみ

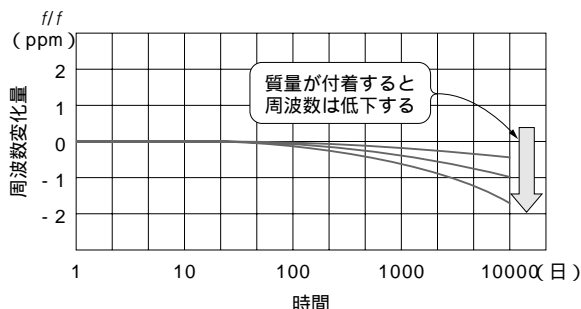



図8 周波数のエージング特性例

横軸は日数，縦軸は周波数変化量．時間が経過するとパッケージ内部に発生した微量のアウト・ガスが振動子表面に付着し，周波数を低下させる．周波数の変化量は素子によってばらつきがあり，その一例を示している．

図9 振り子の動作

振り子を模式的に表したもの．振り子の同じ位置を保持するためには，同じ力で押し続ける必要がある．その関係が発振回路の動作原理と同じになる．

などが発生します．従って，メーカがカタログなどで保証している励振レベル以下での使用を守ることが肝要です．励振レベルPは振動子が振動する電力であり，次の式で表されます．

$$P = I^2 \times R_1$$

図7は，励振レベルと周波数の変化量の関係を表しており，DLD（drive level dependence）特性[注5]と呼んでいます．

図から分かるように，振動子サイズ（内蔵水晶チップ・サイズ）が小さくなればなるほど，または周波数が高いほど励振レベルの影響を受けやすくなり，励振レベルに対する周波数の変動ポイント（周波数の非線形特性）が早まります．言い換えると，振動子サイズが小さいほど，または周波数が高いほど励振レベル（または水晶電流）を抑える必要があるということになります．3225サイズ以下の小型振動子の場合は，周波数の変化量から見て100μW以下に抑えることが無難と言えます．

先ほど，厚みすべりATカット振動子の周波数は水晶チップの厚みに依存すると述べましたが，このことは厚み相当の質量の変化によっても周波数が変動することも意味しています．例えば，空気中の湿気やゴミなど微量な質量が水晶チップ表面に付着した場合は周波数が低下します．この現象を積極的に利用したのがガス・センサや真空蒸着装置の膜厚モニタです．

水晶振動子は高気密で封止させており外部の影響は皆無ですが，内部の材料からの微量なアウト・ガスの発生で**図8**のように周波数が変動する場合があります．この現象を

注5：DLD特性とは，ドライブ・レベルに対する周波数依存性を表している．高レベルになると結晶軸の歪みが大きくなり，周波数の上昇（非線形化）が見られる．近年の小型化により比較的低いレベルでも周波数の上昇が見られるので，ドライブ・レベルの最適化が重要となる．

図10 発振の成長

横軸は時間，縦軸は発振の振幅を表している．回路のノイズ・レベルから振幅が成長して安定状態になるようすを表している．

エージング特性と呼んでおり，水晶メーカはカタログなどで次のように規定するのが一般的です．

「25 ℃の自然放置で年間±数ppm以内」

従って，発振回路を組む場合，このような周波数変動を考慮した発振マージンにすることが必要となります．

水晶発振回路のしくみ

● 発振の動作原理を理解する

発振回路の動作原理は，よく振り子の動作と対比して考えられます．**図9**に示す振り子のモデルにおいて，同じ振り幅で規則正しい振り子の動作を維持させようとする場合，まず最大の振れ幅の位置と時点を検出する必要があります．次に一定の力を規則正しく加える動作を繰り返していけば，その位置と時点が減衰せずに維持されることになります．この時，その振り子は水晶振動子に相当し，検出と一定の力は帰還回路を持った増幅器に相当します．回路のノイ

ズ・レベルから帰還増幅器により発振を成長させて安定状態を保つわけです(**図10**).

帰還増幅器はコルピッツ型発振回路が一般的で，**図11**の回路構成になります．この回路は，水晶振動子の両端に発生した電圧をC_1およびC_2のコンデンサで分圧し，C_1を入力側に接続し，同じ力になる量の検出をします．一方，C_2を出力側に接続し，一定の力を加える役割をさせます．

図12はコルピッツ型発振回路が発振している状態における等価回路を示しています．振動子側から見ると，回路側は等価入力容量C_iと等価入力抵抗R_iの直列回路で表すことができます．ここで，C_iは前述した負荷容量C_Lになります．また，R_iは振動子の等価直列抵抗R_eにより振動が減衰することを打ち消すための負の値を持つ抵抗であり，負性抵抗と呼ばれています．一方，振動子側は等価的に誘導性である実効インダクタンスL_eと実効抵抗R_eの直列回路となります．従って，発振するための位相条件は，

$$\omega L_e - \frac{1}{\omega C_i} = 0$$

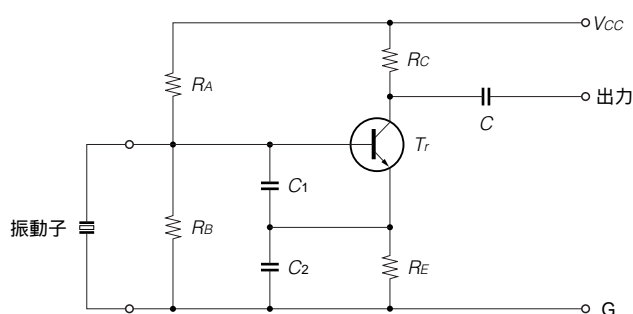
となり，発振周波数が決定されることになります．発振するための振幅の条件は，理論的には次のようになります．

$$|R_i| \geqq R_e$$

図11　コルピッツ型発振回路
一般的なコルピッツ型発振回路．

● 発振回路の良しあしを左右する負性抵抗と発振余裕度

確実な発振の立ち上がりを得るために，実際の回路ではトランジスタのばらつきや回路の引き回しなどを考慮する必要があります．ノイズ・レベルから発振が成長する目的の発振周波数近傍の小信号時では，この負性抵抗が振動子の実効抵抗より十分大きい値になっていることが発振の必要条件となり，経験的に次の式の条件を満たす必要があります．

$$|R_i| \geqq 5 \times R_e$$

ここで，数値は発振余裕度と呼ばれるもので，負性抵抗が振動子の実効抵抗の何倍あるかを表します．例えば，発振余裕度が3倍程度しか確保できない回路では，発振しないまたは発振したりしなかったりの不安定な状態が発生する可能性が出てきます．

図11のコルピッツ回路において，C_1・C_2のリアクタンスが並列抵抗素子よりも比較的小さく，高い周波数では，負性抵抗(等価入力抵抗)R_iは次の式で近似できます．

$$R_i = -\frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2}$$

ここで，g_mはトランジスタの伝達コンダクタンスです．**図13**の曲線①は，この式から求めた負性抵抗の周波数特性です．実際には低い周波数帯ではCRの時定数によってR_iが曲線②のように負の値を示さなくなります．負性抵抗値が負の値から正の値に変わる境界の周波数をカットオフ周波数f_cと呼び，次の式で表すことができます．

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_L \sqrt{\frac{g_m}{R_i}}}$$

(**a**) 一般的な等価回路

(**b**) 簡略化した等価回路

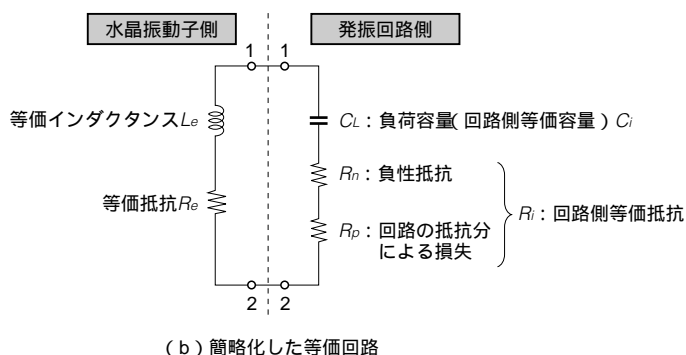



図12　コルピッツ発振回路の等価回路
(a)が一般的な電気的等価回路で，それを簡略化したのが(b)の等価回路．

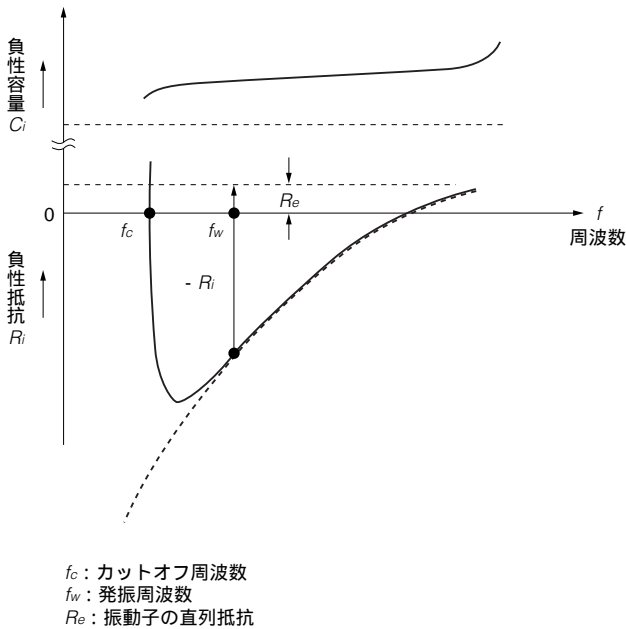



図13　小信号時の負性抵抗の周波数特性

回路側の負性抵抗の周波数特性を表している．横軸は周波数，縦軸は負性抵抗．f_cはカットオフ周波数，f_wは発振周波数，R_eは振動子の直列抵抗．

図14　負性抵抗の周波数特性（負性抵抗変化）

回路の負性抵抗を変化させた時の，周波数特性変化を表している．

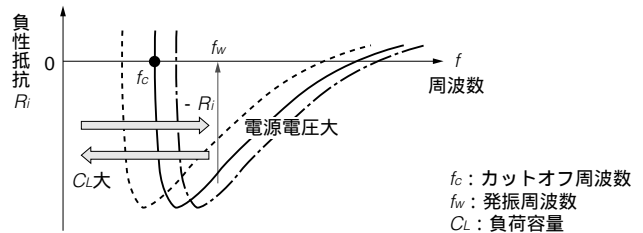



図15　負性抵抗の周波数特性（負荷容量・電源電圧変化）

負荷容量および電源電圧を変化させた時の負性抵抗の周波数の変化を表している．

一方，曲線③は負荷容量C_iの周波数特性を示していますが，こちらはあまり変化が見られません．この式より，R_iを大きくしていくとカットオフ周波数が下がり，①の曲線は②に移動します（**図14**）．このとき，実際の発振周波数f_wにおける負性抵抗$-R_i$は増加します．逆にR_iを小さくすると，①の曲線は③に移動しカットオフ周波数が高くなり，発振周波数における負性抵抗$-R_i$は減少します．

また，C_Lを大きくした場合は，①の曲線が②に移動し，カットオフ周波数は下がり，発振周波数f_wにおける負性抵抗$-R_i$も減少します．さらに，電源電圧を変えた場合も当然のことながらトランジスタのg_mが変わるため負性抵抗に影響が出ます．それは，C_Lの場合とは逆になり，電源電圧を高くすると①の曲線は③に移動し，発振周波数f_wにおける負性抵抗$-R_i$が増加し発振しやすくなります（**図15**）．

以上のように，安定した発振回路を組む場合，負性抵抗や発振余裕度は回路の良しあしを左右する重要なファクタになるので，その特性を十分理解することが肝要です．

参考・引用*文献

(1) 日本水晶デバイス工業会技術委員会編；水晶デバイスの解説と応用，1996年10月.
(2) エプソントヨコム；水晶デバイス商品カタログ，2006年10月.

くさの・じゅん
エプソントヨコム（株）　開発技術統括部設計部課長

<筆者プロフィール>

草野 淳．1987年入社以来AT振動子およびTCXO生産技術・開発・設計に従事.